



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

**SOUČASNÉ PRINCIPY NANÁŠENÍ VRSTEV METODOU
COLD SPRAY, CHARAKTERISTIKA NÁSTŘIKU CU**

CURRENT PRINCIPLES OF COLD SPRAY COATING, CU COATING CHARACTERISTICS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Michal Barinka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Lukáš Řehořek, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav materiálových věd a inženýrství
Student:	Michal Barinka
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Materiálové inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Lukáš Řehořek, Ph.D.
Akademický rok:	2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Současné principy nanášení vrstev metodou Cold Spray, charakteristika nástřiku Cu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cold Spray je technologie povrchové úpravy, která je schopna nanášet kovové částice na kovové substráty za pomoci urychlení těchto částic hnacím plynem na supersonické rychlosti. Výhodou je, že dochází k nanášení vrstev bez natavování částic. Tato technologie je velmi populární v odvětví jako je letectví a kosmonautika, využívá se také při opravách dílců díky svým výjimečným schopnostem vytvářet silné vrstvy o minimální porositě z materiálů náchylných k teplotnímu ovlivnění či oxidaci.

V rámci práce budou shrnuty a popsány principy nanášení vrstev pomocí metody Cold Spray (dále CS) a bude provedena rešerše použitelnosti CS pro aplikace v inženýrské praxi.

Na dodaném vzorku Cu nástřiku bude provedena metalografická a chemická analýza rozhraní a mikrostruktury samotného nástřiku vytvořeného pomocí CS.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Podrobný popis principu vzniku CS nástřiku (principy tvorby mezivrstvy, vzájemné působení částic, princip adheze jednotlivých částic nástřiku).
- 2) Provést rešerši současného stavu CS na trhu a shrnout uplatnění této technologie v inženýrské praxi, nastínit možné budoucí směry aplikace CS.
- 3) Provést materiálový rozbor dodaného vzorku CS nástřiku.

Seznam doporučené literatury:

MORIDI, A., S. M. HASSANI-GANGARAJ, M. GUAGLIANO and M. DAO. Cold spray coating: review of material systems and future perspectives. Surface Engineering. 2014, 36(6), 369-395. DOI: 10.1179/1743294414Y.0000000270. ISBN 10.1179/1743294414Y.0000000270. Dostupné také z: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1179/1743294414Y.0000000270>

IRISSOU, E., J. G. LEGOUX, A. N. RYABININ, B. JODOIN and Ch. MOREAU. Review on Cold Spray Process and Technology: Part I—Intellectual Property. Journal of Thermal Spray Technology. 2008, 17(4), 495–516. DOI: 10.1007/s11666-008-9203-3. ISBN 10.1007/s11666-008-9203-3. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s11666-008-9203-3>

VILLAFUERTE, J. Modern cold spray: materials, process, and applications. Cham: Springer, 2015. ISBN 978-3-319-16771-8.

PAPYRIN, A. N. Cold spray technology. London: Elsevier, 2007. ISBN 00-804-5155-1.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá současnými principy nanášení vrstev metodou Cold Spray. V rešeršní části je pojednáno o principu vzniku vrstvy pomocí metody Cold Spray. Dále je pak shrnut současný stav této technologie na trhu a její uplatnění v praxi. V experimentální části je vyhodnocena struktura deponované vrstvy mědi na dvou různých podkladech.

Klíčová slova

Cold Spray, porozita, povrchová úprava, kritická rychlost

Abstract

This bachelor thesis deals with the current principles of coating with the Cold Spray method. The research part deals with the principle of layer formation using the Cold Spray method. Furthermore, the current state of this technology on the market and its application in practice is summarized. The structure of deposited copper layer on two different substrates is evaluated in the experimental part.

Keywords

Cold Spray, porosity, surface functionalization, critical velocity

Bibliografická citace

BARINKA, Michal. *Současné principy nanášení vrstev metodou Cold Spray, charakteristika nástřiku Cu* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/112945>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav materiálových věd a inženýrství. Vedoucí práce Lukáš Řehořek.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Současné principy nanášení vrstev metodou cold spray, charakteristika nástřiku Cu* vypracoval samostatně, a že veškeré použité informační zdroje jsou uvedeny v seznamu literatury.

V Brně dne 23.5. 2019

.....

Michal Barinka

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Lukášovi Řehořkovi, Ph.D. za odborné vedení bakalářské práce, ochotu, trpělivost, čas strávený při konzultacích a za jeho velmi cenné rady a připomínky.

Dále také děkuji firmě Impact Innovations GmbH (Německo) za dodaný vzorek.

Obsah

1	Úvod	1
2	Historický vývoj	2
3	Princip metody CS.....	4
3.1	Vznik vrstvy.....	4
3.2	Kritická rychlost a depoziční okno	6
3.2.1	Vliv velikosti částic	7
3.2.2	Vliv typu plynu.....	8
3.3	Porovnání metody CS s termálními nástřiky	8
4	Zařízení CS.....	10
4.1	Nízkotlaké zařízení	11
4.2	Vysokotlaké zařízení.....	12
5	Využití metody CS v praxi	15
5.1	Materiály	15
5.2	Povrchová úprava	16
5.3	Oprava dílů	18
5.4	Výroba polotovarů	20
6	Experimentální část	21
6.1	Výchozí materiály.....	21
6.2	Příprava vzorků.....	21
6.3	Výsledky	23
6.4	Diskuse.....	27
6.5	Závěr	28
	Literatura	29
	Seznam použitých zkratk a symbolů	31
	Seznam obrázků.....	32
	Seznam tabulek.....	33

1 Úvod

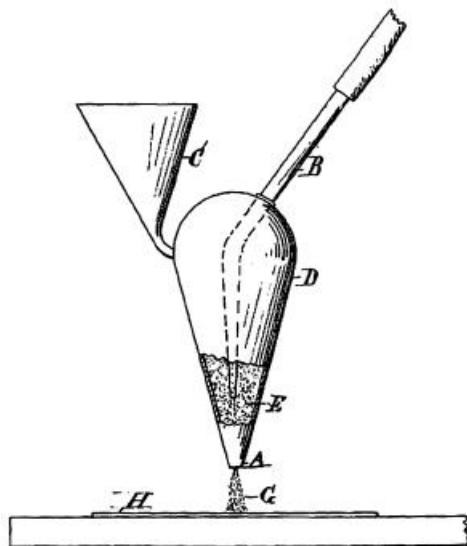
Cold Gas Dynamic Spray (CGDS), nebo jednoduše Cold Spray (CS), je poměrně nová a stále se rozvíjející technologie povrchové úpravy materiálů [1].

Na rozdíl od tradičních termálních nástřiků (jako je např. Plasma Spray, HVOF nebo Laser Cladding) nedochází v procesu CS k natavování deponovaných částic. Díky tomu je tato metoda vhodná pro nanášení materiálů citlivých na oxidaci (jako je např. hliník, měď a titan) a materiálů citlivých na teplotu (příkladem jsou nanostrukturní a amorfni prášky, sklo, polymery) [1].

Při této metodě jsou částice (o velikosti obvykle 1–50 μm) urychlovány v Lavalově trysce (konvergentně/divergentní tvar) pomocí stlačeného vysokorychlostního plynu (300–1200 m/s). Tato technologie se používá pro řadu aplikací, především jako tepelná bariéra, ochrana proti korozi, ochrana proti opotřebení, elektronická zařízení nebo biomedicínské implantáty [1].

2 Historický vývoj

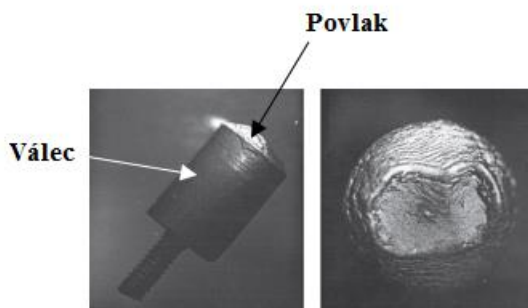
Metoda CS je nejnovějším členem skupiny termálních nástřiků, jejichž vývoj zahájil Schoop v roce 1915. Základní myšlenka technologie CS se však objevila ještě před samotným vznikem termálních nástřiků. V roce 1900 popsal Thurston metodu, při které byly nanášeny kovové částice na kovovou desku pomocí expanze stlačeného plynu. Princip této metody je znázorněn na obr. 2.1. Kvůli nízké rychlosti, která dosahovala maxima 350 m/s při pokojové teplotě, byla omezena použitelnost některých kovů. V roce 1901 navrhl Thurston vylepšení v podobě předehřevu deponovaných částic pro jejich snadnější ukládání do povrchu materiálu [1, 2].



Obr. 2.1 Schéma Thurstonova patentu (A – tryska; B – vzduchové potrubí; C – násepka; D – komora; E, G – kovový prášek; H – nanesená vrstva [2])

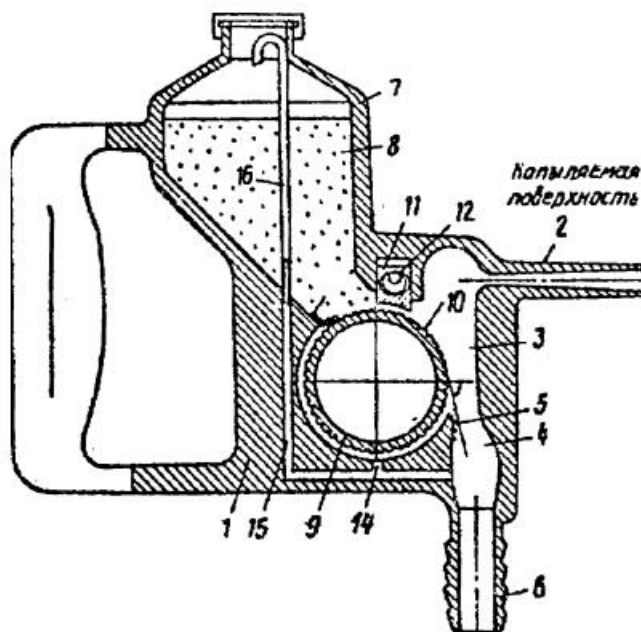
V roce 1958 patentoval Rocheville podobný způsob nanášení částic jako Thurston. Rozdíl byl v použití Lavalovy trysky, díky níž částice dosahovaly vyšší rychlosti. Při tomto procesu se na povrchu obrobku vytvářela velmi tenká stejnoměrná vrstva. Rychlost částic však nebyla dostatečná pro její následný růst [2].

V 80. letech 20. století se Anatolii N. Papyrin a jeho kolegové z ruské akademie věd zabývali studií těles vystavených dvoufázovému proudění (plyn + pevné částice). Do té doby se věřilo, že schopnost vytvářet povlaky mají pouze roztavené částice. Během experimentů v aerodynamickém tunelu se však ukázalo, že částice hliníku poháněné heliem za pokojové teploty při rychlosti 450 m/s vytvářely na povrchu válce vrstvu se šupinatou strukturou bez viditelných pórů a dutin (obr. 2.2). Následovaly pokusy, při kterých se podrobně zkoumaly parametry ovlivňující vznik vrstvy, mezi něž patří např. materiál částic a substrátu, hnací plyn, teplota a velikost částic. Vědci tuto novou metodu povlakování nazvali jako Cold Spray [3].



Obr. 2.2 Nanesená vrstva hliníku (Převzato a upraveno z [3])

V roce 1986 sestrojili Alkhimov a jeho kolegové první zařízení CS, jehož schéma je znázorněno na obr. 2.3. Toto zařízení bylo schopno nanášet částice o velikosti 1–200 μm při rychlosti 650–1200 m/s. V letech 1985–2000 bylo v Rusku podáno několik desítek patentů. V roce 1994 představil A. N. Papyrin metodu CS v USA, odkud se po několika letech rozšířila do celého světa. Velkého zájmu se tato technologie dočkala především v automobilovém a leteckém průmyslu [2].



Obr. 2.3 První zařízení CS [2]

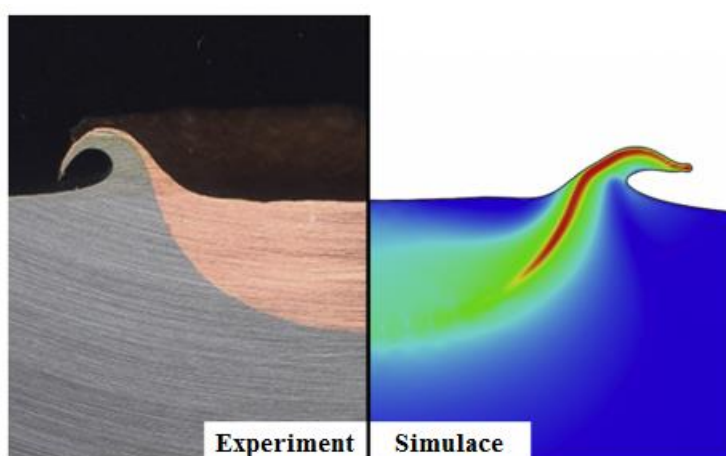
3 Princip metody CS

3.1 Vznik vrstvy

Tvorba povlaku v procesu CS se dělí na dvě etapy [4]:

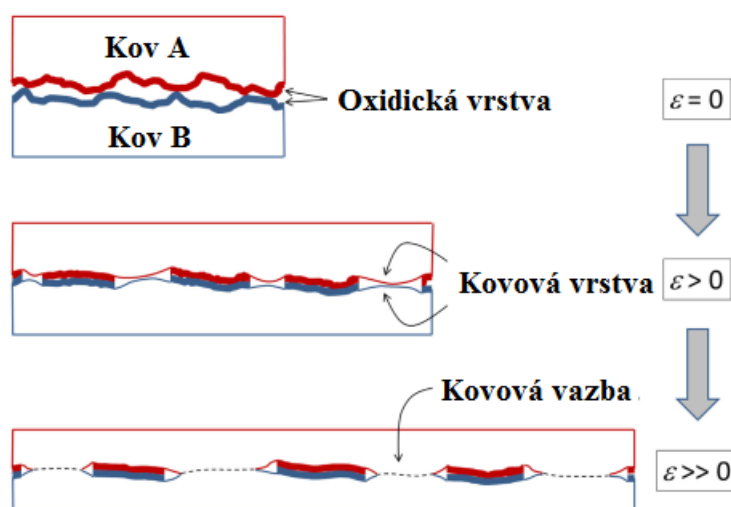
- 1) adheze částic k substrátu (neboli tvorba první vrstvy)
- 2) následný růst vrstvy

V současnosti se předpokládá, že hlavní příčinou vzniku vazby mezi deponovanými částicemi a substrátem je adiabatická smyková nestabilita, která vzniká při vysoké rychlosti deformace částic. V okolí adiabatické smykové nestability dochází vlivem silné plastické deformace k výtrysku materiálu (obr. 3.1). Tento výtrysk materiálu pomáhá narušit oxidické vrstvy, kterými jsou pokryty částice i substrát [5, 6].



Obr. 3.1 Výtrysk materiálu (Převzato a upraveno z [5])

Narušením oxidických vrstev dochází k těsnému kontaktu dvou čistých kovových povrchů. (obr. 3.2). V kombinaci s vysokým tlakem tak mezi částicemi a substrátem vzniká silná metalurgická vazba. V místě metalurgické vazby dochází k dynamické rekrytalizaci a k tvorbě intermetalických fází [4, 5].

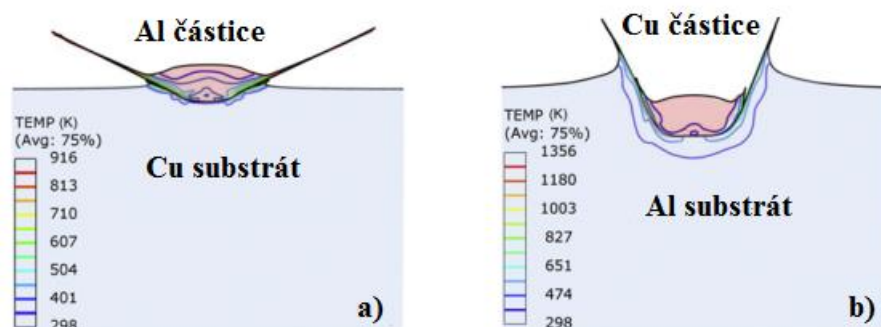


Obr. 3.2 Narušení oxidické vrstvy (Převzato a upraveno z [5])

Rozhraní dělíme podle tvrdosti částic a substrátu na [7]:

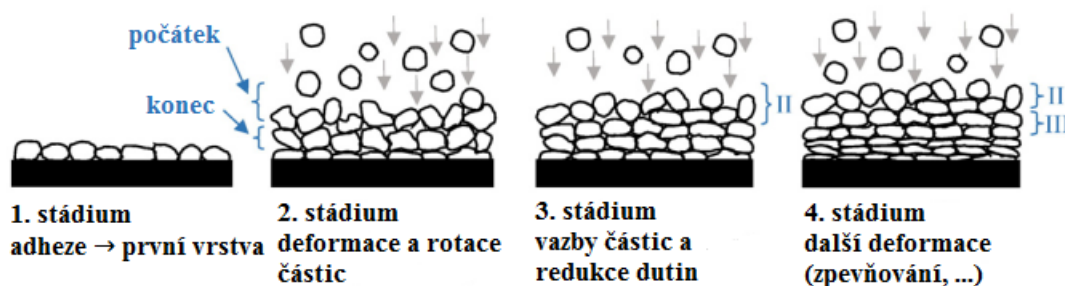
- 1) měkké/tvrdé
- 2) tvrdé/měkké

Při nanášení měkkých částic na tvrdý substrát dochází k vyšším deformacím částic, které se na povrchu substrátu začnou zplošťovat (obr. 3.3 a)). U depozice tvrdých částic na měkký substrát se částice mírně deformují a zapustí se do povrchu substrátu (obr. 3.3 b)) [7].



Obr. 3.3 Proces depozice pro a) měkké/tvrdé, b) tvrdé/měkké rozhraní (Převzato a upraveno z [7])

Jakmile první částice dosáhnou adheze k substrátu a vytvoří tak první vrstvu, následuje růst vkladu pomocí deformace a rotačního pohybu dalších částic. Plastická deformace částic snižuje porozitu vrstvy a zesiluje vazbu mezi částicemi. Zhutňováním povlaku dochází k vytvrzování částic. Postup vzniku vrstvy je uveden na obr. 3.4 [4].



Obr. 3.4 Princip vzniku vrstvy (Převzato a upraveno z [4])

3.2 Kritická rychlost a depoziční okno

Aby se částice deformovaly a vytvářely na povrchu substrátu trvalý povlak, je nutné, aby překonaly tzv. kritickou rychlost. Kritická rychlost se stanovuje podle rovnice (1) [8]:

$$u_{cr} = \sqrt{\frac{4C_1\sigma_{ult}}{\rho_p} \left(1 - \frac{T_{pi} - T_r}{T_m - T_r}\right) + C_2c_{pp}(T_m - T_{pi})} \quad (1)$$

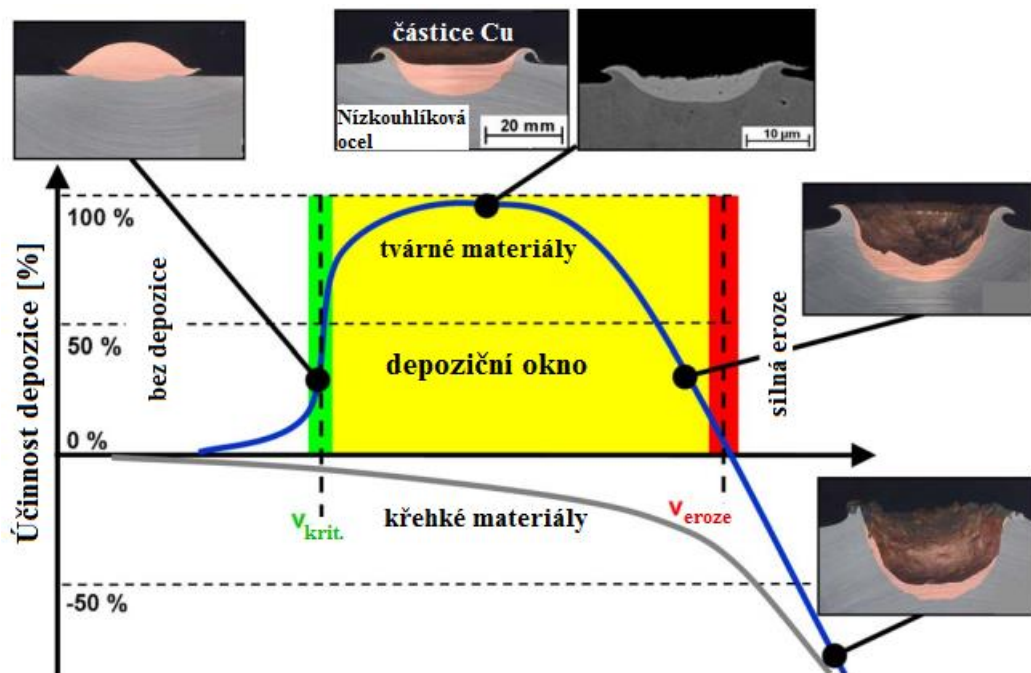
kde u_{cr} – kritická rychlost částic [m/s]
 σ_{ult} – mez pevnosti v tahu [Pa]
 ρ_p – hustota částic [kg/m³]
 T_{pi} – teplota dopadu částic [K]
 T_r – pokojová teplota [K]
 T_m – teplota tání částic [K]
 c_{pp} – tepelná kapacita částic [J/kg.K]
 C – konstanta (pro kritickou rychlost $C_1 = 1,2$; $C_2 = 0,3$)

Kritická rychlost částic závisí především na vlastnostech deponovaného materiálu. V tab. 1 je uvedeno experimentální vyhodnocení hodnot kritické rychlosti pro různé kovové materiály. Z tabulky vyplývá, že kritická rychlost částic nezávisí na teplotě tání nanášených částic [9].

Tab. 1 Kritická rychlost částic kovových materiálů (Převzato a upraveno z [9])

Materiál	Teplota tání [°C]	Kritická rychlost [m/s]
Hliník	660	620–660
Titan	1670	700–890
Cín	232	160–180
Zinek	420	360–380
Nerezová ocel (316L)	1400	700–750
Měď	1084	460–500
Nikl	1455	610–680
Tantal	2996	490–650

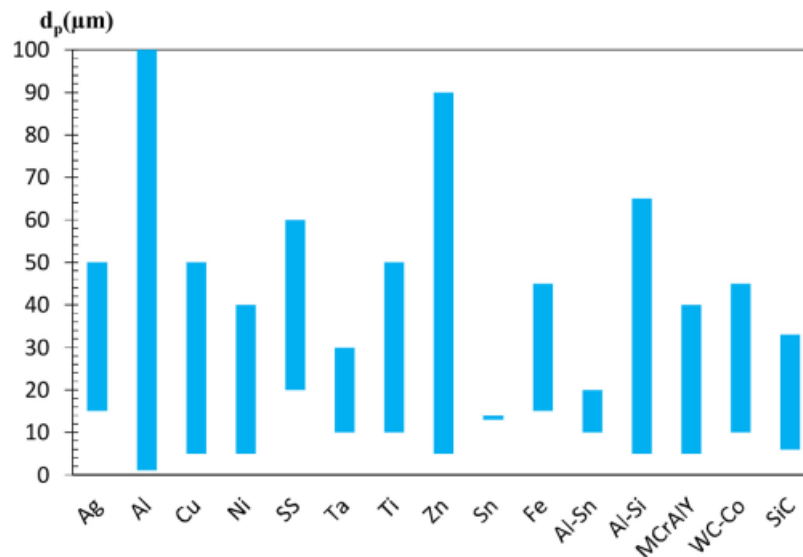
Účinnost depozice je efektivita nanášení částic na povrch substrátu, která závisí na mnoha faktorech, mezi něž patří např. kritická rychlost, úhel dopadu částic, morfologie prášku, vlastnosti povrchu substrátu, mez kluzu nebo teplota a tlak na hranici kontaktu částic se substrátem. Na obr. 3.5 je znázorněna účinnost depozice, z něhož vyplývá, že kritická rychlost nastává při 50% účinnosti depozice. Jakmile účinnost klesne na 0 %, nazýváme tento jev jako rychlost eroze. Pro většinu materiálů je rychlost eroze dvakrát nebo třikrát větší než kritická rychlost [1, 9].



Obr. 3.5 Depoziční okno (Převzato a upraveno z [9])

3.2.1 Vliv velikosti částic

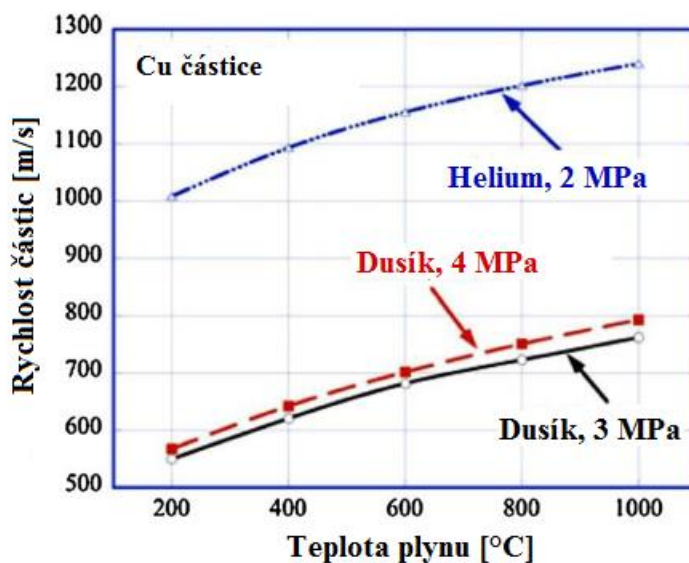
Obecně platí, že čím vyšší je velikost částic, tím obtížnější je urychlit na požadovanou rychlost, čímž klesá účinnost depozice. S výjimkou hliníku a zinku se pro většinu materiálů používá velikost částic 20–60 μm. Na obr 3.6 jsou uvedeny typické velikosti částic pro nanášení metodou CS [10].



Obr. 3.6 Rozsah velikostí částic [10]

3.2.2 Vliv typu plynu

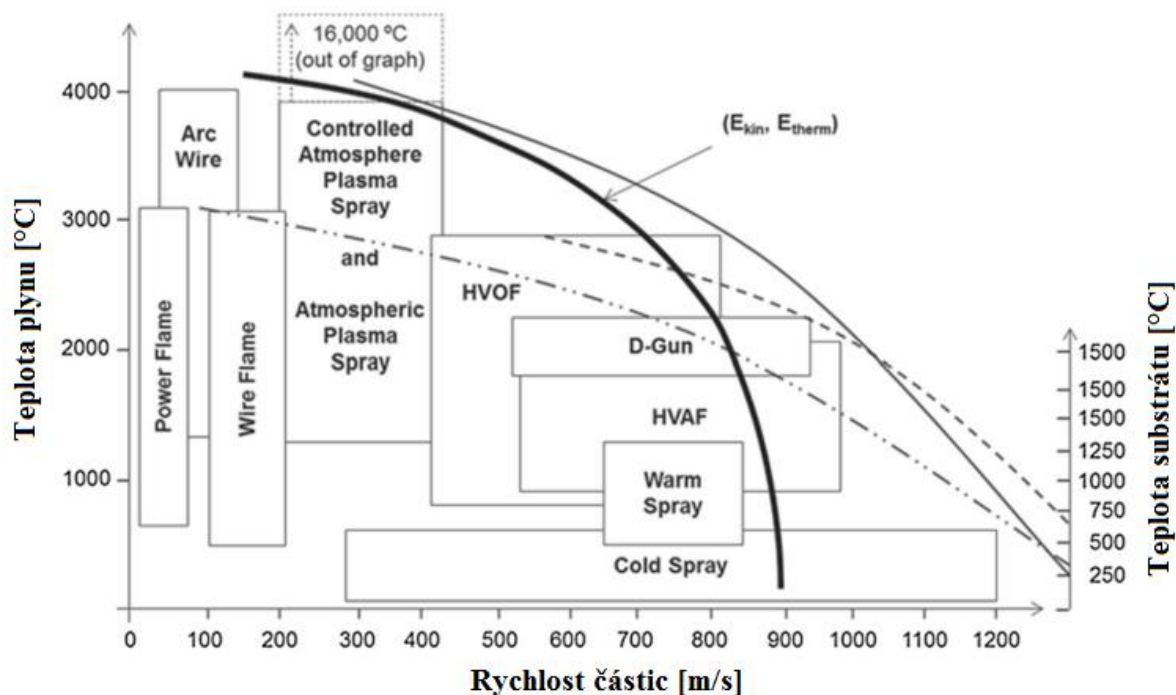
V procesu CS se běžně používají tři typy plynu – helium, dusík a vzduch. Při vyšší teplotě a tlaku plynu, nebo nižší molární hmotnosti plynu, dochází k vyšším rychlostem částic. Se zvyšující se rychlostí částic dochází k významnému zlepšení účinnosti depozice, porozity a pevnosti vazby mezi jednotlivými částicemi. Helium je díky svým vlastnostem nejúčinnějším hnacím plynem v porovnání s dusíkem a vzduchem (obr. 3.7). Používá se při depozici kovů s vysokou teplotou tání. Jeho nevýhodou je ovšem vysoká cena. Proto se pro snížení výrobních nákladů nejčastěji využívá dusík nebo vzduch. Dusík má navíc tu výhodu, že zabraňuje oxidaci vzorků [10, 11].



Obr. 3.7 Závislost rychlosti částic na parametrech hnacího plynu (Převzato a upraveno z [11])

3.3 Porovnání metody CS s termálními nástřiky

Metoda CS patří do skupiny termálních nástřiků, které využívají pro vznik vrstvy kombinaci termální a kinetické energie. Termální energie slouží k natavení nebo změkčení částic, kdežto kinetická energie je potřebná pro dosažení husté a pevné vazby. Na obr. 3.8 je znázorněna závislost mezi rychlostí částic a teplotou plynu a substrátu jednotlivých metod [12].



Obr. 3.8 Oblasti působení jednotlivých metod (Převzato a upraveno z [12])

Vzhledem k relativně nízkým teplotám a vysoké rychlosti částic má metoda CS řadu výhod, mezi něž patří [12]:

- 1) bez natavení částic
- 2) žádný růst zrn
- 3) bez fázových změn
- 4) minimální tepelné ovlivnění substrátu
- 5) bez oxidace
- 6) vysoká hustota, nízká porozita
- 7) vysoká tepelná a elektrická vodivost
- 8) vysoká pevnost
- 9) snižování zbytkového napětí
- 10) odolnost proti korozi
- 11) vysoká účinnost depozice
- 12) nanášení různorodých materiálů
- 13) ultratenké vrstvy
- 14) šetrnost k životnímu prostředí, zdraví a bezpečnosti

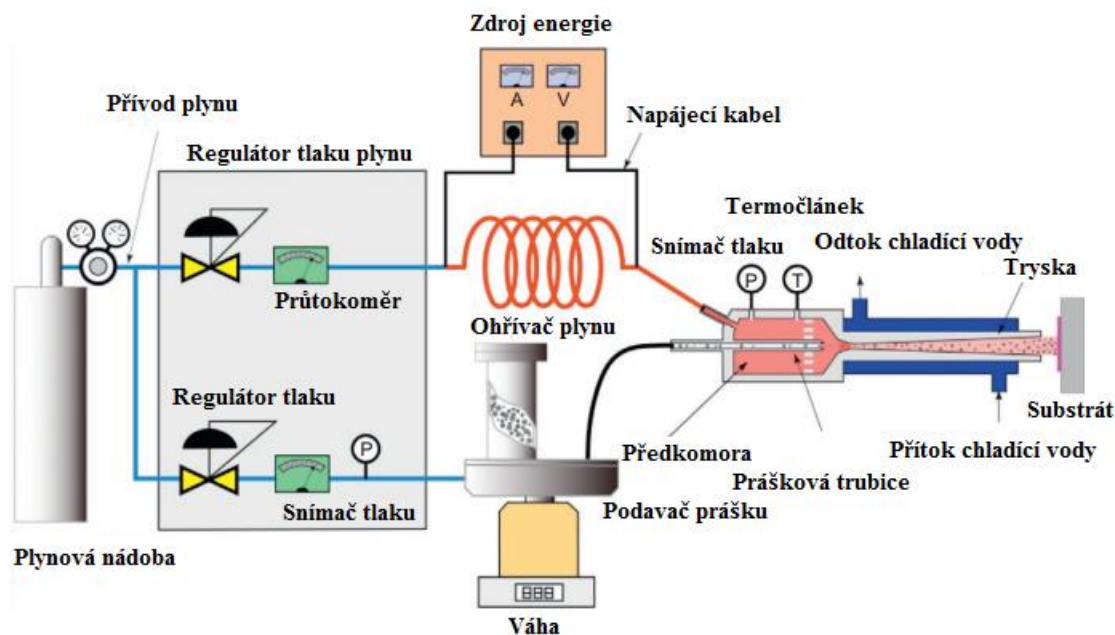
Metoda CS má následující omezení [12]:

- 1) téměř nulová tažnost
- 2) omezení použitelnosti řady materiálů
- 3) podkladový materiál musí být dostatečně tvrdý
- 4) vysoká spotřeba plynu
- 5) omezená dostupnost norem

4 Zařízení CS

Schéma běžného systému CS je znázorněno na obr. 4.1. Zařízení CS se skládá ze čtyř základních prvků [13]:

- jednotka pro přívod plynu včetně zdroje plynu a regulátoru tlaku
- jednotka pro předehtev plynu včetně ohříváče a zdroje energie
- podavač prášku
- zbraň s Lavalovou tryskou



Obr. 4.1 Schéma zařízení CS (Převzato a upraveno z [13])

Pracovní plyn (dusík, helium nebo vzduch) se přivádí z plynové nádoby do jednotky s regulátorem tlaku, kde se stlačí na hodnotu dosahující až 5 MPa. Zde se plyn rozdělí na dva proudy. První část plynu přivádí částice z jednoho nebo více podavače prášku do předkomory zbraně. Druhá část plynu prochází ohřívákem plynu, kde se ohřeje na teplotu až 1100 °C (vždy pod teplotu tání nanášeného materiálu), a následně se přivede do předkomory zbraně. Před vstupem do Lavalovy trysky se tyto dva proudy smísí. Interakce nadzvukového proudu částic se substrátem může dosáhnout hladiny hluku 90 dB, proto depozice částic probíhá v odhlučněné kabině [13, 14].

Předehtevání plynu se používá ze dvou důvodů [14]:

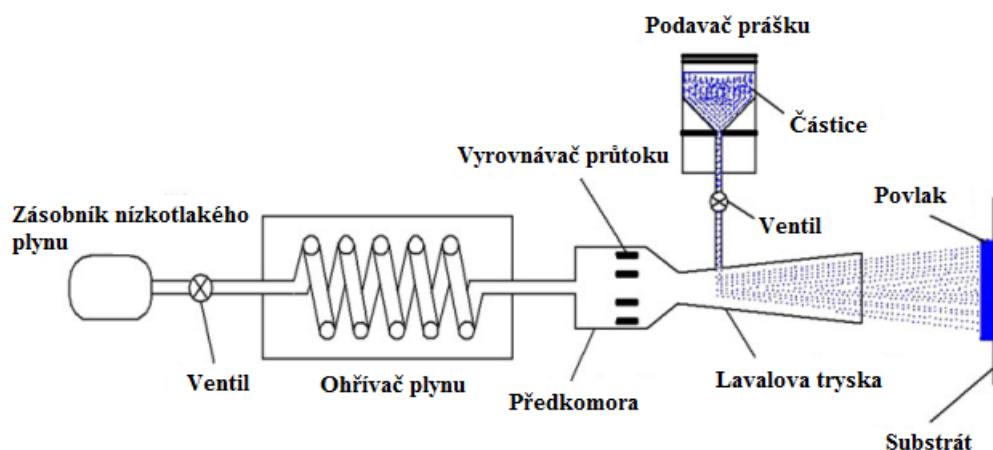
- se zvyšující se teplotou plynu roste i jeho rychlost, čímž se současně zvyšuje i rychlost částic
- částice s vyšší teplotou mají vyšší plasticitu, díky čemuž se zvyšuje i jejich deformovatelnost při nárazu

Podle způsobu vstřikování částic do trysky rozlišujeme systémy CS na dva typy [1]:

- nízkotlaké (radiální vstřikování)
- vysokotlaké (axiální vstřikování)

4.1 Nízkotlaké zařízení

Low-pressure cold spray (LPCS) je nízkotlaký proces metody CS, při kterém jsou částice zaváděny radiálně do divergentní části Lavalovy trysky tak, jak je znázorněno na obr. 4.2. Hnací plyn (nejčastěji dusík nebo vzduch) je stlačen na relativně nízký tlak (obvykle pod 1 MPa). Takto stlačený plyn může dosáhnout teploty až 550 °C. Kombinací nízkého tlaku a způsobu vstřikování částic do trysky dosahují částice rychlosti přibližně 300–600 m/s [1].



Obr. 4.2 Schéma nízkotlakého zařízení (Převzato a upraveno z [1])

Zařízení LPCS pracují při nižším tlaku, proto nepotřebují příliš velký a drahý vysokotlaký podavač prachu. Erozi je vystavena pouze divergentní část Lavalovy trysky, která má díky tomu delší životnost v porovnání s vysokotlakými systémy. Malé rozměry, relativně nízká hmotnost a skutečnost, že lze zbraň ovládat ručně, umožňuje využít LPCS zařízení pro terénní aplikace. Nejčastěji se tyto systémy používají pro korozní ochranu, opravu odlitků nebo malých ploch. Nicméně nízká teplota a tlak nosného plynu omezují možnosti nanášení některých materiálů. Pro nízkotlaké zařízení jsou nejpoužívanějšími materiály tvárné kovy s nízkou teplotou tání, jako je např. měď, hliník, zinek a cín. Další nevýhodou je poměrně nízká účinnost depozice (maximálně 50 %). Jedním z prvních LPCS zařízení byly systémy DYMET (obr. 4.3), dodávané ruskou firmou Obninsk Center for Powder Spraying (OCPS). Později se na trhu objevily zařízení SST (CenterLine SST, Kanada) a Kinetic Metallization (Inovati, USA). Přehled LPCS zařízení je uveden v tab. 2 [1, 12, 13, 15].

Tab. 2 Přehled nízkotlakých zařízení

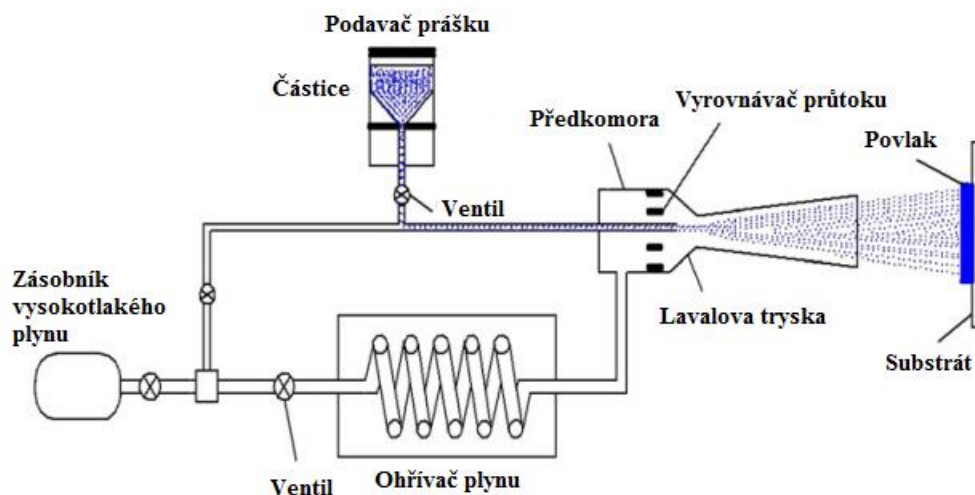
Zařízení	Teplota [°C]	Tlak [MPa]	Průtok plynu [m ³ /min]	Váha [kg]	Výkon [kW]	Zdroj
DYMET 413		0,6–0,9	0,3	18	3,3	[16]
DYMET 423	200–600	0,5–0,8	0,3–0,4	20	3,3	[17]
Kinetic Metallization	max. 1000	0,4–0,9			3,8	[18]
SST PX	0–550	0,7–1,7		78		[19]
SST P	0–550	0,7–1,7	0,46–1,05	69		[19]



Obr. 4.3 Zařízení DYMET 413 [16]

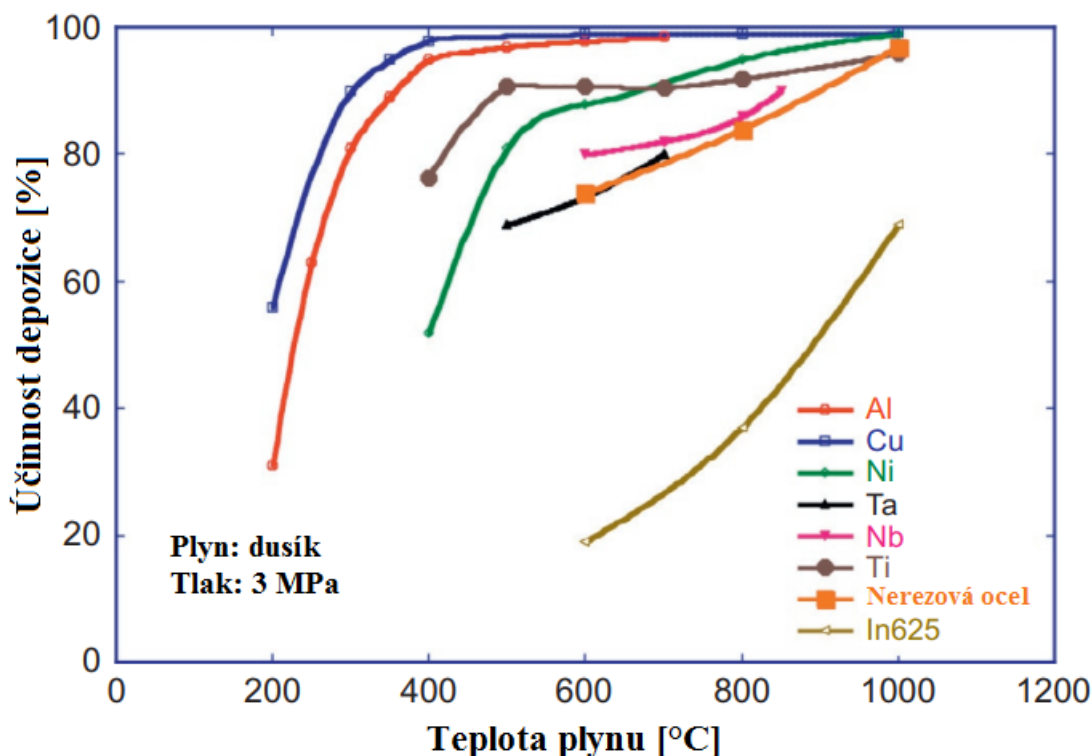
4.2 Vysokotlaké zařízení

High-pressure cold spray (HPCS) je vysokotlaký proces metody CS, při kterém jsou pevné částice zaváděny axiálně do předkomory zbraně (obr. 4.4), kde se smísí s vysoce stlačeným plynem (až 5 MPa). Hnací plyn (helium nebo dusík) se předehřívá na teplotu až 1100 °C. Při průchodu Lavalovou tryskou se mění entalpie plynu na kinetickou energii, která snižuje teplotu částic a urychluje je na rychlost 600–1200 m/s [1, 12, 13].



Obr. 4.4 Schéma vysokotlakého zařízení (Převzato a upraveno z [1])

Hlavní výhodou HPCS systémů v porovnání s LPCS systémy je, že jsou částice vystaveny vyšší teplotě a tlaku po delší čas. Částice tak dosahují výrazně vyšších rychlostí, což má příznivý vliv na kritickou rychlost. Díky tomu jsou zařízení HPCS schopny nanášet i kovy s vysokou teplotou tání, jako je např. nikl nebo tantal. Další výhodou HPCS systémů je vysoká účinnost depozice, která je pro většinu kovů a jejich slitiny větší než 90 % (obr. 4.5) [12, 13].



Obr. 4.5 Účinnost depozice systému PCS 1000 firmy Plasma Giken (převzato a upraveno z [13])

Nevýhodou HPCS zařízení je, že tlak v podavači prášku musí být větší než v nosném plynu, aby se zabránilo zpětnému toku částic. Podavače prášku pracují s výrazně vyšším tlakem, proto jsou nebezpečné, velmi velké a drahé. Dalším problémem je vysoká cena helia, která lze částečně snížit zavedením filtračního systému. Pro většinu operací se proto používá buď čistý dusík, který pracuje za extrémně vysokých hodnot teploty a tlaku, nebo směs helia a dusíku. Další nevýhodou je rychlé opotřebení hrdla Lavalovy trysky, které vede ke zhoršení vlastností vytvářených vrstev [12, 15].

Prvním HPCS systémem na trhu byl Kinetic 3000 (Cold Gas Technology GmbH, Německo), které se pro průmyslové účely používalo od roku 2001. Toto zařízení se stalo předlohou pro dnešní systémy Impact Innovations 5/8 a 5/11 (obr. 4.6) firmy Impact Innovations GmbH (Německo). Firma CenterLine SST (Kanada) dodává na trh kromě LPCS zařízení i systémy HPCS, které v porovnání s konkurencí pracují při nižším tlaku (3,5 MPa) a teplotě (550 °C). Dalšími dostupnými systémy jsou PCS 800 a PCS 1000 (Plasma Giken Co. Ltd., Japonsko). Zvláštností je zařízení VRC Gen III Hybrid Portable High Pressure Cold Spray System společnosti VRC Metal System (USA), které je jediným přenosným systémem ze skupiny HPCS zařízení. Přehled jednotlivých zařízení je uveden v tab. 3 [3, 13, 20].



Obr. 4.6 Sestava zařízení Impact Innovations 5/11 [21]

Tab. 3 Přehled vysokotlakých zařízení

Zařízení	Teplota [°C]	Tlak [MPa]	Průtok částic [l/h]	Výkon [kW]	Zdroj
Impact Innovations 5/8	800	5	1,8	34	[21]
Impact Innovations 5/11	1100	5	1,8	40	[21]
Kinetic 3000	700–800	3,5	<1		[3]
Kinetic 4000	800	5		33	[22]
PCS 800	800	5	0,5	35	[23]
PCS 1000	1000	5	1	70	[23]
SST EP	550	0,7–3,5			[19]
SST EPX	550	0,7–3,5			[19]
VRC Gen III Hybrid					
Portable High Pressure Cold Spray System	750	7	0,6	45	[20]

5 Využití metody CS v praxi

5.1 Materiály

Na konci 20. století bylo možné nanášet metodou CS pouze kovové materiály. Za posledních 15 let však došlo k velkému rozvoji této technologie a v současné době tak lze tuto metodu uplatnit v nanášení různorodých materiálů, jako jsou např. kompozity s kovovou maticí (Metal Matrix Composites – MMC), keramika, polymery a nanomateriály. V tab. 4 je uveden přehled používaných materiálů a rok jejich výskytu v literatuře [4].

Tab. 4 Vývoj materiálů v metodě CS (Převzato a upraveno z [4])

	1999	2003	2005	2006	2007	2008	Vývoj publikací		Počet publikací
							Konst.	Nárůst	
Kovy a slitiny								X	39,0 %
Kompozity (MMC)								X	19,7 %
Keramika							X		2,2 %
Oxidy							X		2,6 %
Nanomateriály								X	14,0 %
WC cermety								X	3,9 %
Intermetalika							X		5,3 %
Kovová skla								X	4,8 %
Polymery							X		1,8 %
Energetické materiály							X		3,5 %
MCrAlY							X		3,1 %

Nejběžnějšími materiály používanými v procesu CS jsou kovy a jejich slitiny. Kovové materiály splňují jednu z důležitých podmínek nutnou pro vznik vazby mezi částicemi a substrátem. Tou podmínkou je schopnost deformace částic při nárazu na podklad. Díky tomu je pro kovové částice snadné vytvářet se substrátem pevnou vazbu. Nanášením kovů se dosahuje i vysoké účinnosti depozice (pro měď je to téměř 100 %). Nanesené kovové vrstvy se nejčastěji používají k ochraně proti korozi nebo k opravě již zkorodovaných částí [13, 15].

Nanášení keramických materiálů je obtížné z důvodu jejich křehkého chování. Jedním z možných řešení je přidání keramických částic do kovové matrice. MMC je kompozitní materiál, ve kterém je alespoň jedna ze dvou nebo více složek kov. Přítomnost keramických částic v MMC zvyšuje odolnost proti korozi, chemickou odolnost i odolnost proti opotřebení vrstvy v porovnání s povlaky nanesených pomocí čistých kovů [15, 24].

Mechanismus vzniku vazby pro polymerní a keramické materiály není zcela znám, z důvodu odlišného chování polymerních a keramických částic při deformaci po nárazu v porovnání s kovovými materiály. Po jejich pochopení lze v budoucnu předpokládat jejich široké uplatnění [15].

5.2 Povrchová úprava

V oblasti povrchové úpravy materiálů je metoda CS populární díky svým přednostem, mezi něž patří [4]:

- a) silná vazba mezi nanesenými částicemi a substrátem
- b) depozice různorodých materiálů
- c) stejné vlastnosti vrstvy a výchozího materiálu

Nejběžnější aplikací metody CS je ochrana proti korozi a oxidaci povrchů kovových konstrukcí. V praxi se tato technologie používá např. pro nanášení cínu na měděné přípojnice, díky čemuž se zabráňuje jejich korozi a prodlužuje se tak jejich životnost (obr. 5.1) [4].



Obr. 5.1 Ochranná vrstva cínu na měděných přípojnicích [4]

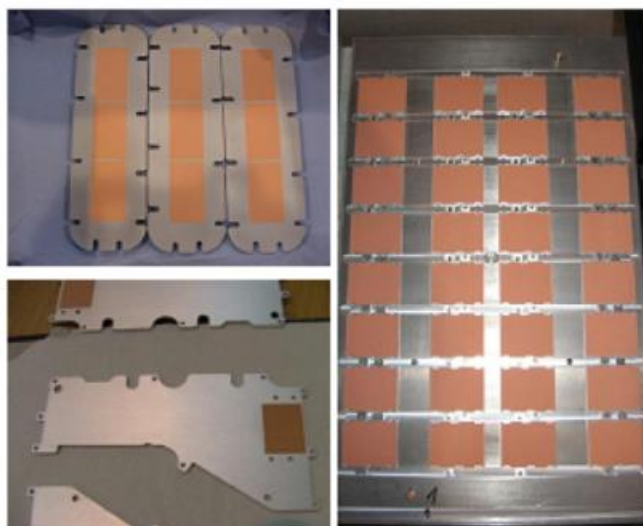
Metoda CS je vhodná také pro velké součásti vystavené agresivnímu prostředí. Např. v jaderném průmyslu se metoda CS používá jako protikorozní ochrana palivových nádrží (obr. 5.2), čímž přispívá k podstatným úsporám na materiálu [4].



Obr. 5.2 Ochranná vrstva mědi na palivové nádrži [4]

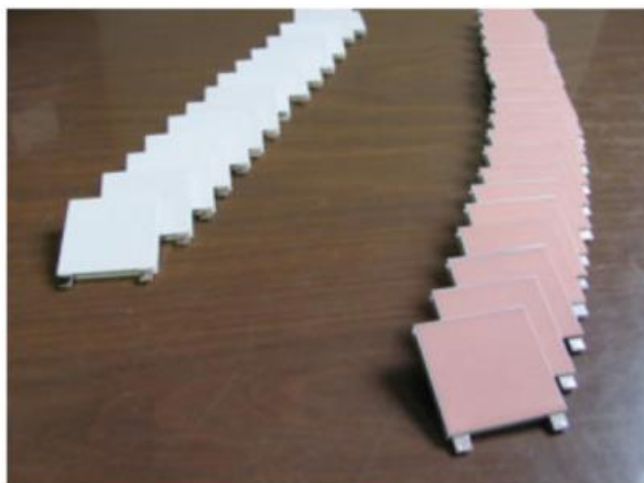
Nanášení různorodých materiálů činí proces CS zajímavý v oblasti solárních panelů. Depozice povlaku TiO_2 zabraňuje změně krystalické struktury, čímž nedochází ke ztrátám fotokatalytického výkonu [4].

Další možností uplatnění této technologie je v elektrotechnice. Pro zajištění účinného vedení tepla se provádí depozice mědi na elektrické chladiče a chladicí jednotky (obr 5.3) [4].



***Obr. 5.3** Měděný povlak na elektrickém chladiči [4]*

Metoda CS se rovněž využívá jako spolehlivý metalizační proces. Umožňuje přímé nanášení spojů na keramické nebo skleněné podklady (obr. 5.4), a může tak nahradit jiné techniky nanášení, jako je např. sítotisk nebo galvanické pokovování [4].



***Obr. 5.4** Elektronické součástky [4]*

5.3 Oprava dílů

Metoda CS je populární v oblasti a renovace součástí, jako jsou např. lopatky turbín, bloky motorů, vrtule helikoptéry, písty, ventily, vačkové hřídele a převodovky [25].

Mezi hlavní výhody patří [11]:

- 1) schopnost zabránit tepelnému ovlivnění podkladového materiálu
- 2) úspora materiálu a energií
- 3) zachování vlastností výchozího práškového materiálu

Další výhodou je, že zařízení CS jsou přenosná a mohou tak provádět opravy na jakémkoliv místě (obr. 5.5) [25]. Díky svým výhodám se metoda CS označuje za ekologicky přijatelnou [4].



Obr. 5.5 Oprava zkorodovaného povrchu pomocí přenosného CS zařízení [25]

Nejvíce se oprav a renovací součástí pomocí metody CS využívá v leteckém průmyslu, zejména pro hliník a jeho slitiny, MMC na bázi hliníku, měď a její slitiny, MMC na bázi mědi, hořčík a jeho slitiny, nikl, korozivzdorné oceli a jejich kombinace [25].

Americká armáda je hlavním uživatelem této metody, kdy při opravách modulů vrtulníků třídy Seahawk ušetří náklady ve výši 35–50 %. Další možností aplikace je oprava poškozených otvorů spojených panelů (obr. 5.6) u bombardovacího vysokorychlostního letadla B1. Využitím metody CS se tak prodlouží životnost vojenské techniky v hodnotě miliónů dolarů [4, 25].



Obr. 5.6 Oprava otvorů u spojovaných panelů [4]

V automobilovém průmyslu se metoda CS používá k opravě velkých konstrukcí složitějších tvarů (obr. 5.7) Příkladem je oprava zkorodovaných těles olejových čerpadel motorů Caterpillar–3116 a Caterpillar–3126 [4, 11].



Obr. 5.7 Oprava odlitku [4]

Metoda CS se také používá pro opravu starožitných kovových soch (obr. 5.8). Pomocí přenosného zařízení CS je umožněna depozice zinku a mědi přímo na místě a není potřeba sochy přemisťovat [4].

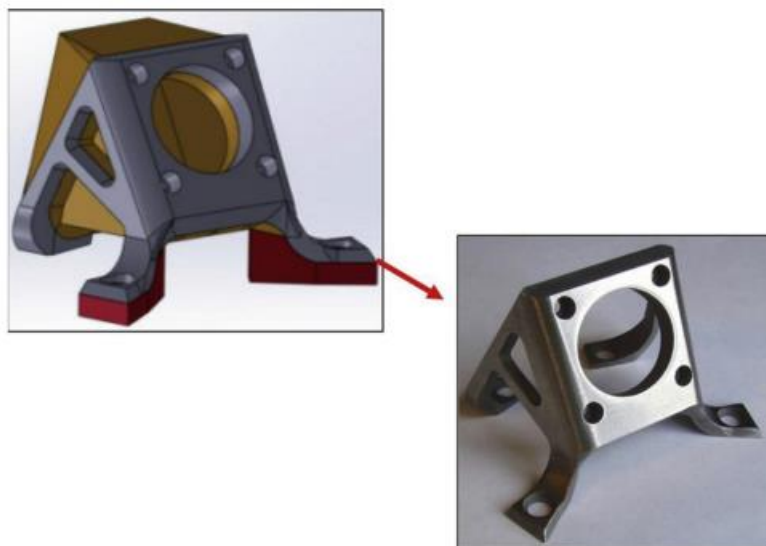


Obr. 5.8 Oprava kovových soch pomocí metody CS [4]

5.4 Výroba polotovarů

Pomocí CAD a CAM programů je možné metodou CS vyrábět celé součásti o tloušťce stěny až přes 2 cm. Díky tomu lze vytvářet tělesa i se složitou geometrií, které mají nižší zbytkové napětí a redukovanou hmotnost. Relativně přesné konečné rozměry hotové součásti snižují náklady související s dokončovacími operacemi, mezi něž patří např. obrábění [4, 25].

Příklad aplikace 3D výroby těles je znázorněn na obr. 5.9. Jedná se o ocelový držák, který byl nanesen pomocí technologie CS na odnímatelnou podporu [25].



Obr. 5.9 3D výroba součástí [25]

Zavedením metody CS do technologie 3D tisku se dosahuje 1000x rychlejší depozice kovových materiálů v porovnání s tradičními 3D tiskárnami [26].

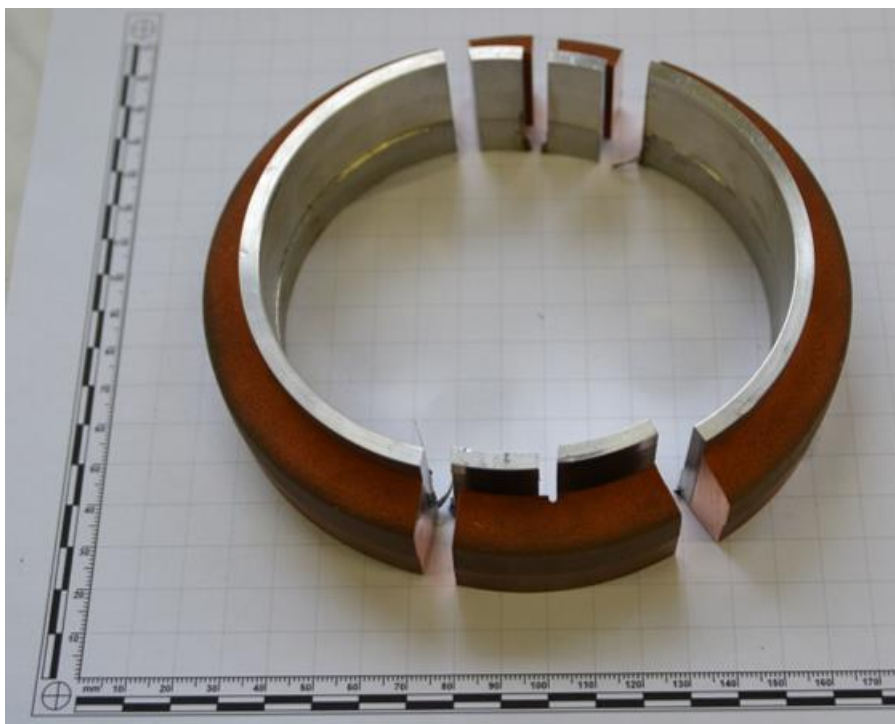
6 Experimentální část

6.1 Výchozí materiály

Pro analýzu mikrostruktury a mezifázového rozhraní byla použita měď nanesená metodou Cold Spray na dva různé podklady. V obou případech bylo použito zařízení Impact Innovations 5/11 (Impact Innovations GmbH, Německo). První vzorek (měď/ocel) byl dodán přímo firmou Impact Innovations GmbH, Německo. Ve druhém případě byla měď nanesena na hliník na Ústavu materiálových věd a inženýrství Vysokého učení technického v Brně. Jako hnací plyn byl použit dusík stlačený na hodnotu 3,5 MPa při teplotě 500 °C. Použitý práškový materiál s velikostí částic 40 µm byl dodán firmou SAFINA a.s.

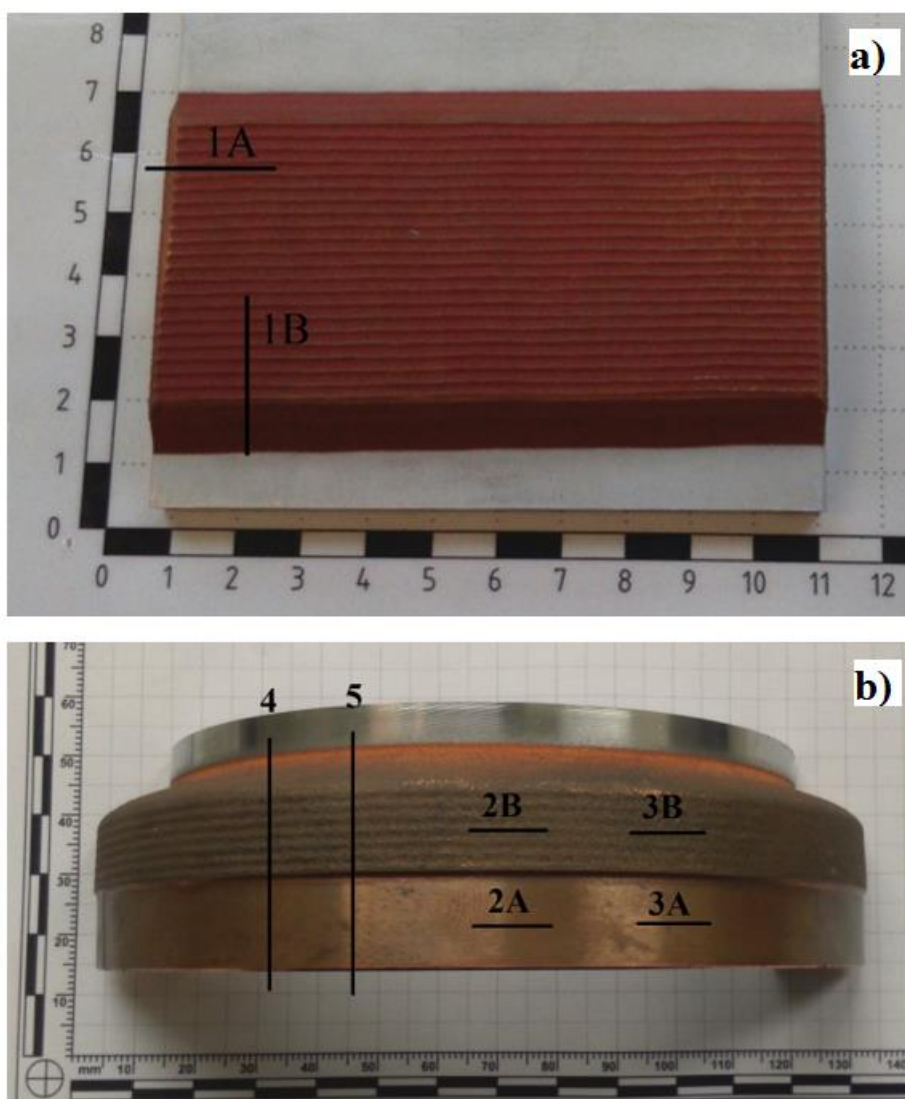
6.2 Příprava vzorků

Vzorky byly rozřezány na rozbrušovacím stroji Discotom-2 od firmy Struers. Při řezání vzorku měď/ocel došlo k oddělení měděné vrstvy od substrátu (obr. 6.1).



Obr. 6.1 Oddělená vrstva mědi

Roviny řezů pro jednotlivé vzorky jsou znázorněny na obr. 6.2. Po rozřezání byly vzorky zality za tepla pomocí prášků MultiFast Green a Dentacryl při teplotě 180 °C v montážním lisu PR-4X od firmy LECO. Následně byly vzorky broušeny pomocí brusných papírů na bázi SiC se zrnitostí 320, 500, 1000, 2400 a 4000. Poté byly vzorky leštěny na leštících plátnech s diamantovou pastou o zrnitosti 7; 3 a 0,7 µm. Broušení i leštění bylo provedeno na zařízení PEDEMIN od firmy Struers.



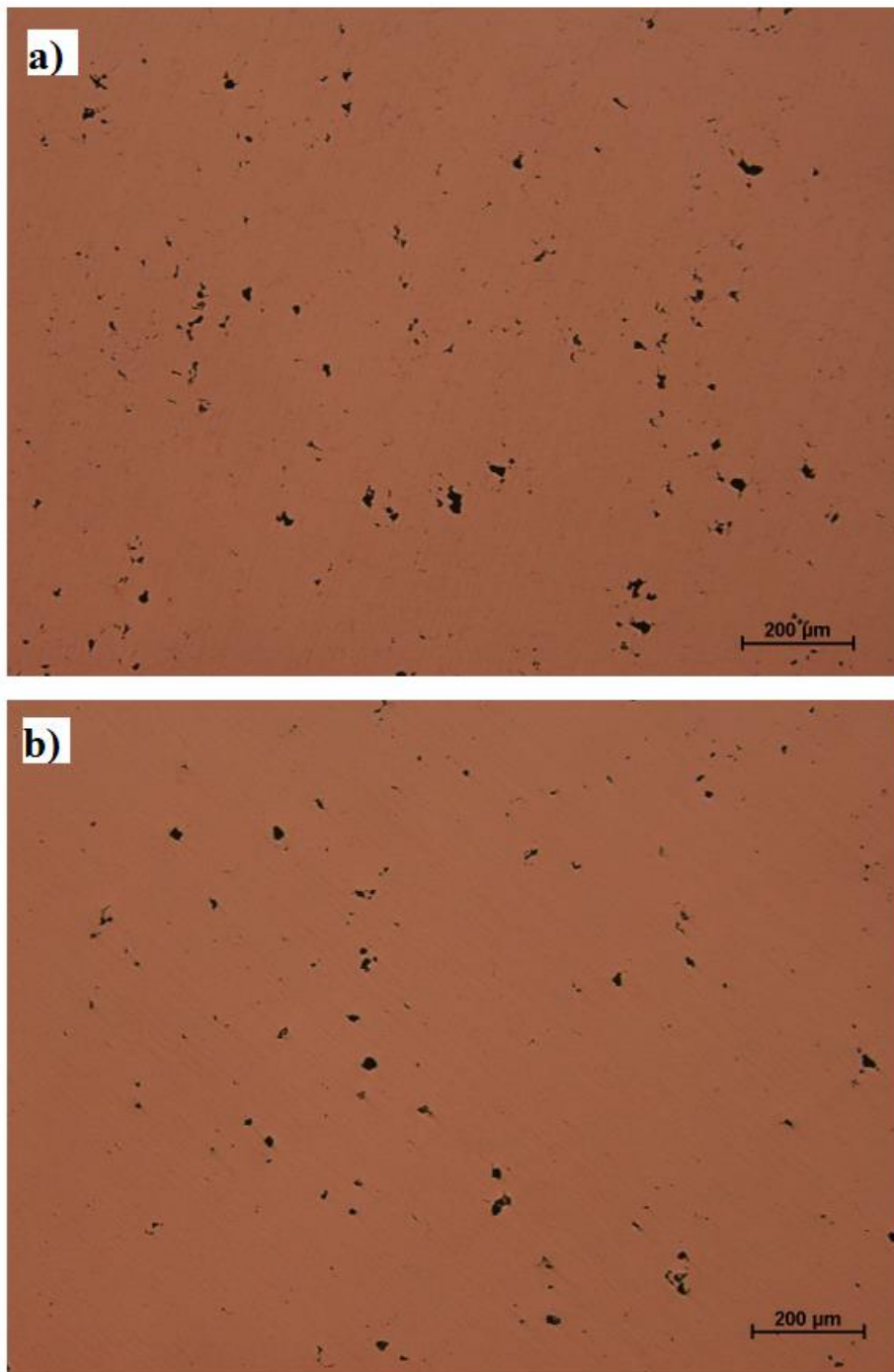
Obr. 6.2 Roviny řezů pro jednotlivé vzorky (a) - měď/hliník, b) - měď/ocel)

Pro vyvolání mikrostruktury byl použit leptací roztok na slitiny mědi o chemickém složení 1,3 % FeCl_3 , 22,8 % HCl a 75,9 % ethanolu.

Struktura vzorků byla pozorována na invertovaném metalografickém mikroskopu GX51 od firmy Olympus. Porozita vzorků byla stanovena pomocí programu ImageJ určeného pro obrazovou analýzu.

6.3 Výsledky

Ze dvou dodaných materiálů bylo zhotoveno celkem osm metalografických vzorků – dva pro materiál měď/hliník (vzorky 1A a 1B) a šest pro měď/ocel (vzorky 2A, 2B, 3A, 3B, 4 a 5). Na obr. 6.3 jsou znázorněny struktury mědi po vyleštění pro oba materiály. Na každém metalografickém vzorku bylo pořízeno deset snímků. Pomocí těchto snímků byla v programu ImageJ zjišťována porozita nanesené vrstvy mědi. Přehled výsledků je uveden v tab. 5.

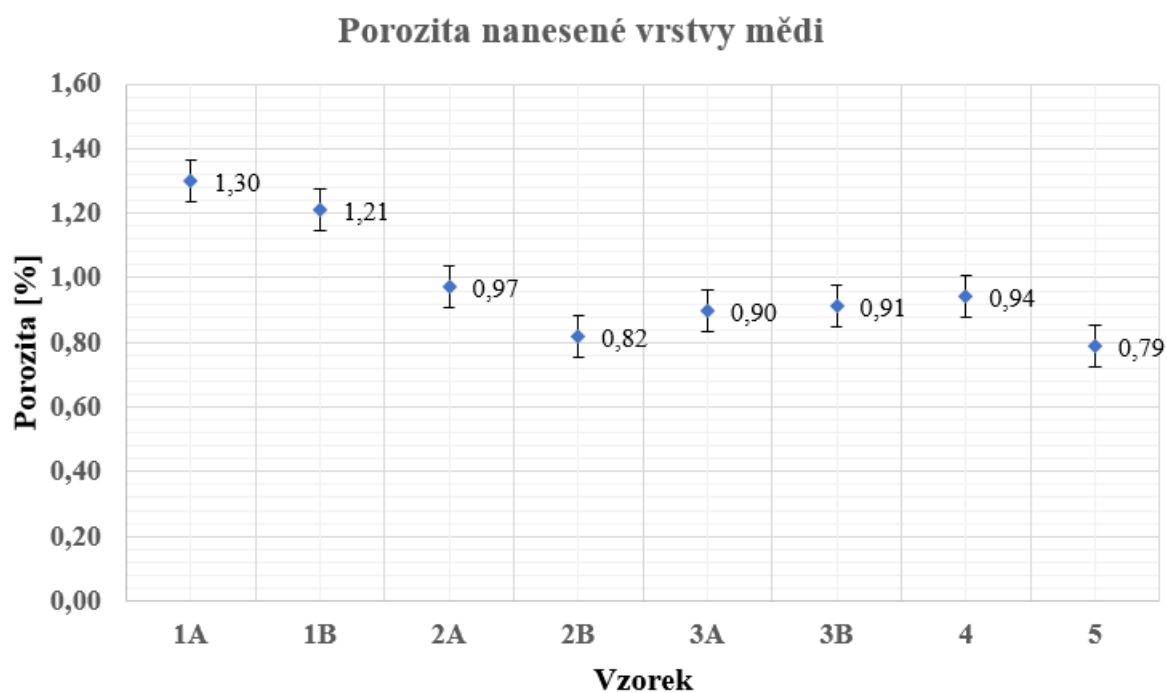


Obr. 6.3 Struktura nanesené vrstvy mědi (a) - materiál měď/hliník, b) - materiál měď/ocel) – zvětšeno 100x

Tab. 5 Výsledky porozit jednotlivých vzorků

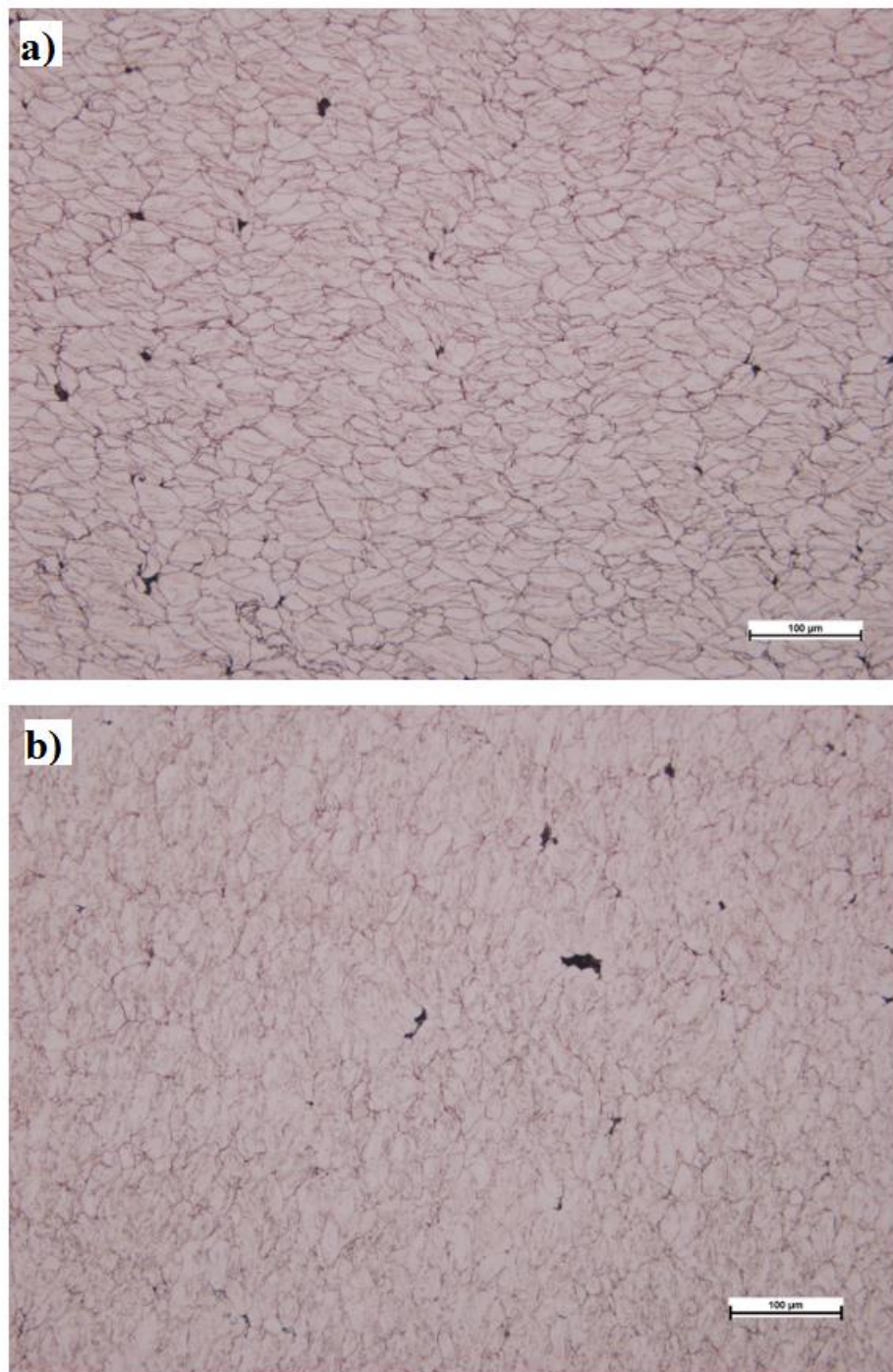
Materiál	měď/hliník		měď/ocel					
Vzorek	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4	5
1	0,780	1,027	0,862	0,844	0,979	0,848	0,878	0,921
2	0,768	1,808	0,928	0,790	0,981	0,649	0,826	0,857
3	1,139	1,705	1,035	1,115	1,106	0,916	0,822	0,669
4	1,516	1,002	1,189	0,698	0,795	0,968	1,148	0,948
5	1,491	1,361	0,951	0,689	0,881	1,278	0,908	1,039
6	1,406	0,787	1,101	1,067	0,751	1,299	0,810	0,621
7	1,688	0,961	0,762	0,871	0,778	0,972	1,138	0,960
8	1,409	1,398	0,719	0,689	0,741	0,899	1,117	0,534
9	1,579	1,192	0,933	0,707	0,872	0,785	0,880	0,712
10	1,217	0,868	1,236	0,705	1,105	0,505	0,890	0,629
Průměr	1,30	1,21	0,97	0,82	0,90	0,91	0,94	0,79

Na obr. 6.4 jsou uvedeny výsledné hodnoty porozity jednotlivých vzorků.



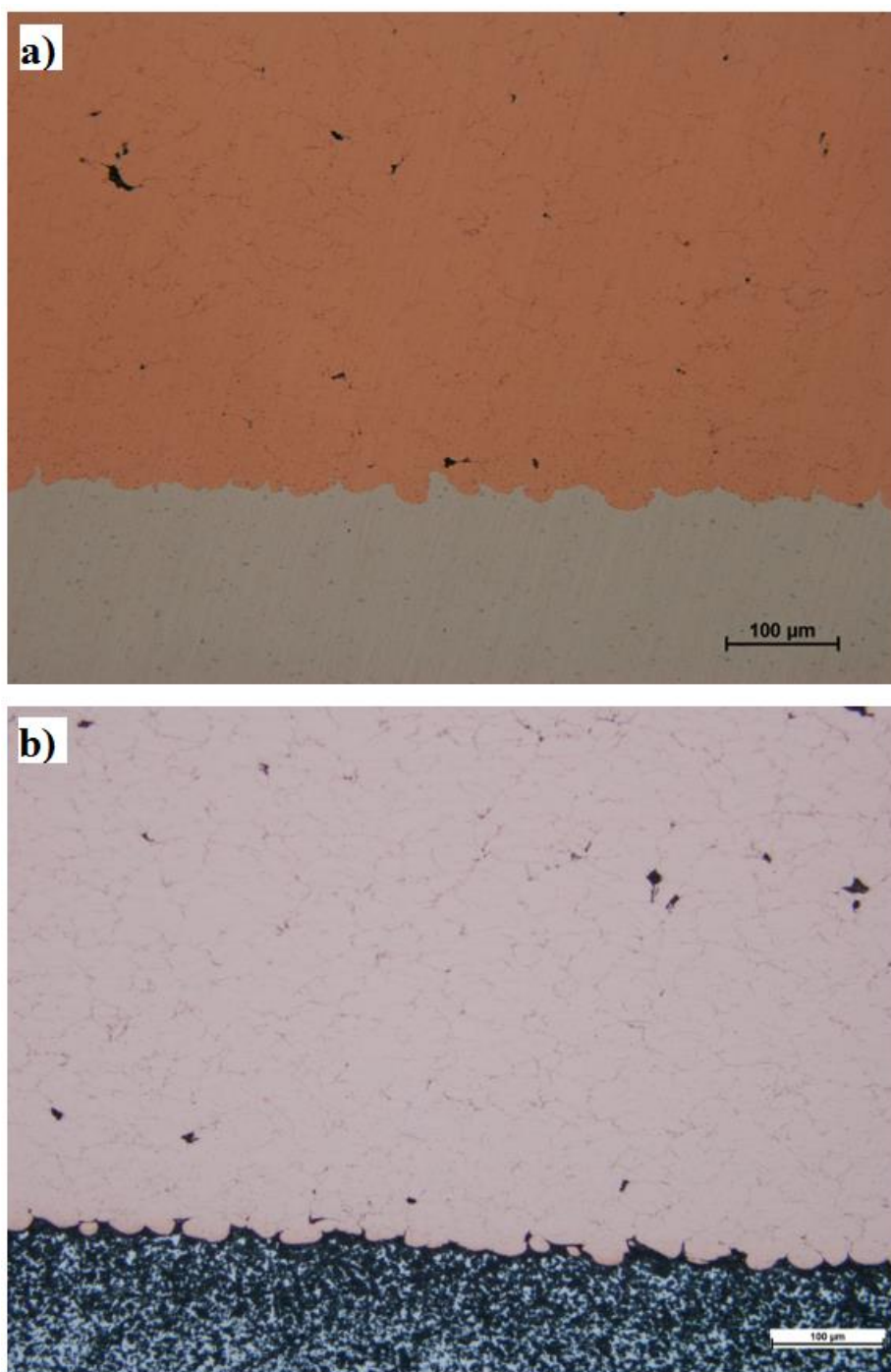
Obr. 6.4 Graf porozity nanesené vrstvy mědi

Na obr. 6.5 je znázorněna mikrostruktura nanesené vrstvy mědi po leptání. Z obrázku je patrná deformace deponovaných částic.



Obr. 6.5 Mikrostruktura nanesené vrstvy mědi po leptání (a) - měď/hliník, b) - měď/ocel) - zvětšeno 200x

Na obr. 6.6 je znázorněno mezifázové rozhraní vzorku měď/ hliník v nenaleptaném i naleptaném stavu. Z obrázku 6.6 a) je patrné, že nanesené měděné částice dokonale přilnuly k nerovnostem povrchu hliníku, čímž vznikla pevná vazba mezi těmito materiály.



Obr. 6.6 Mikrostruktura rozhraní vzorku měď/hliník (a) v nenaleptaném, b) v naleptaném stavu) - zvětšeno 200x

6.4 Diskuse

V rámci experimentální části práce bylo připraveno celkem osm metalografických vzorků (dva pro materiál měď/hliník a šest pro materiál měď/ocel). Pro každý vzorek byla stanovena porozita pomocí programu ImageJ. Výsledky naměřených porozit lze shrnout následovně:

- a) pro materiál měď/hliník byla určena porozita deponované vrstvy mědi 1,21 % a 1,30 %
- b) pro materiál měď/ocel byla určena porozita deponované vrstvy mědi v rozmezí 0,79–0,97 %

Oba povlaky byly nanášeny pomocí zařízení Impact Innovations 5/11 od společnosti Impact Innovations GmbH (Německo). Pro vzorek mědi, která byla nanášena na Ústavu materiálůvých věd a inženýrství Vysokého učení technického v Brně, byly parametry nástřiku následující. Jako hnací plyn byl použit dusík, který měl teplotu 500 °C a byl stlačený na hodnotu 3,5 MPa.

U vzorku měď/ocel dodaného firmou Impact Innovation GmbH nejsou známy přesné parametry nástřiku. S ohledem na výsledky porozit lze však předpokládat, že částice mědi byly ukládány na podklad při vyšší teplotě a pravděpodobně i tlaku.

Důvodem oddělení měděné vrstvy od oceli může být nízká rychlost depozice. Ta je ovlivněna rozhraním částic a substrátu. Jak je uvedeno v kapitole 3.1, pro rozhraní tvrdých částic a měkkého substrátu (v našem případě měď/hliník) dochází k zapuštění částic hluboko do povrchu substrátu. Pro rozhraní měkkých částic a tvrdého substrátu (v našem případě měď/ocel) dochází k velké deformaci a zploštění částic. Při nízké rychlosti nanášení tak může vzniknout slabá vazba mezi podkladem a nanesenou vrstvou.

6.5 Závěr

V rámci teoretické části byl popsán princip vzniku vrstvy metodou CS. Dále pak byla provedena rešerše současného stavu dostupných zařízení CS na trhu a uplatnění této technologie v praxi.

V experimentální části byly porovnány povlaky mědi nanesené na dva různé podklady.

Na základě výsledků lze říci, že výsledné vlastnosti vrstvy závisí na vstupních parametrech, mezi které patří teplota a tlak plynu, rozhraní částic a substrátu.

Dále pak bylo zjištěno, že metodou CS je možné nanášet povlaky libovolné tloušťky o minimální porozitě.

Literatura

- [1] SINGH, Harminder, T. S. SIDHU, S. B. S. KALSI a J. KARTHIKEYAN. Development of cold spray from innovation to emerging future coating technology. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* [online]. 2013, **35**(3), 231-245 [cit. 2019-04-15]. DOI: 10.1007/s40430-013-0030-1. ISSN 1678-5878. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s40430-013-0030-1>
- [2] IRISSOU, Eric, Jean-Gabriel LEGOUX, Anatoly N. RYABININ, Bertrand JODOIN a Christian MOREAU. Review on Cold Spray Process and Technology: Part I—Intellectual Property. *Journal of Thermal Spray Technology* [online]. 2008, **17**(4), 495-516 [cit. 2019-04-15]. DOI: 10.1007/s11666-008-9203-3. ISSN 1059-9630. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11666-008-9203-3>
- [3] PAPYRIN, A. N. *Cold spray technology*. London: Elsevier, 2007. ISBN 0080451551.
- [4] RAOELISON, R.N., Ch. VERDY a H. LIAO. Cold gas dynamic spray additive manufacturing today: Deposit possibilities, technological solutions and viable applications. *Materials & Design* [online]. 2017, **133**, 266-287 [cit. 2019-04-18]. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.07.067. ISSN 02641275. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S026412751730744X>
- [5] ASSADI, H., H. KREYE, F. GÄRTNER a T. KLASSEN. Cold spraying – A materials perspective. *Acta Materialia* [online]. 2016, **116**, 382-407 [cit. 2019-04-23]. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.06.034. ISSN 13596454. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359645416304530>
- [6] YIN, Shuo, Xiaofang WANG, Xinkun SUO, Hanlin LIAO, Zhiwei GUO, Wenya LI a Christian CODDET. Deposition behavior of thermally softened copper particles in cold spraying. *Acta Materialia* [online]. 2013, **61**(14), 5105-5118 [cit. 2019-04-23]. DOI: 10.1016/j.actamat.2013.04.041. ISSN 13596454. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359645413003145>
- [7] MENG, Fanchao, Dianyin HU, Ye GAO, Stephen YUE a Jun SONG. Cold-spray bonding mechanisms and deposition efficiency prediction for particle/substrate with distinct deformability. *Materials & Design* [online]. 2016, **109**, 503-510 [cit. 2019-04-29]. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.07.103. ISSN 02641275. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0264127516310012>
- [8] OZDEMIR, Ozan C., Christian A. WIDENER, Michael J. CARTER a Kyle W. JOHNSON. Predicting the Effects of Powder Feeding Rates on Particle Impact Conditions and Cold Spray Deposited Coatings. *Journal of Thermal Spray Technology* [online]. 2017, **26**(7), 1598-1615 [cit. 2019-05-2]. DOI: 10.1007/s11666-017-0611-0. ISSN 1059-9630. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11666-017-0611-0>
- [9] SCHMIDT, Tobias, Hamid ASSADI, Frank GÄRTNER, Horst RICHTER, Thorsten STOLTENHOFF, Heinrich KREYE a Thomas KLASSEN. From Particle Acceleration to Impact and Bonding in Cold Spraying. *Journal of Thermal Spray Technology* [online]. 2009, **18**(5-6), 794-808 [cit. 2019-05-2]. DOI: 10.1007/s11666-009-9357-7. ISSN 1059-9630. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11666-009-9357-7>
- [10] RAOELISON, R.N., Y. XIE, T. SAPANATHAN, M.P. PLANCHE, R. KROMER, S. COSTIL a C. LANGLADE. Cold gas dynamic spray technology: A comprehensive review of processing conditions for various technological developments till to date. *Additive Manufacturing* [online]. 2018, **19**, 134-159 [cit. 2019-05-5]. DOI: 10.1016/j.addma.2017.07.001. ISSN 22148604. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S221486041630207X>
- [11] YIN, Shuo, Pasquale CAVALIERE, Barry ALDWELL, Richard JENKINS, Hanlin LIAO, Wenya LI a Rocco LUPOI. Cold spray additive manufacturing and repair:

- Fundamentals and applications. *Additive Manufacturing* [online]. 2018, **21**, 628-650 [cit. 2019-05-7]. DOI: 10.1016/j.addma.2018.04.017. ISSN 22148604. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214860417302993>
- [12] *Modern cold spray: materials, process, and applications*. Editor Julio VILLAFUERTE. Cham: Springer, 2015. ISBN 978-3-319-16771-8.
- [13] HUANG, R. a H. FUKANUMA. Future trends in cold spray techniques. *Future Development of Thermal Spray Coatings* [online]. Elsevier, 2015, 2015, s. 143-162 [cit. 2019-05-7]. DOI: 10.1016/B978-0-85709-769-9.00006-3. ISBN 9780857097699. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780857097699000063>
- [14] SOVA, A., S. GRIGORIEV, A. OKUNKOVA a I. SMUROV. Potential of cold gas dynamic spray as additive manufacturing technology. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2013, **69**(9-12), 2269-2278 [cit. 2019-05-9]. DOI: 10.1007/s00170-013-5166-8. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-013-5166-8>
- [15] MORIDI, Atieh. *Powder Consolidation Using Cold Spray* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2017 [cit. 2019-05-12]. SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology. DOI: 10.1007/978-3-319-29962-4. ISBN 978-3-319-29961-7.
- [16] <http://innoveco.com.au/pdf/Dymet413.pdf>
- [17] <http://en.dymet.net/spraying-equipment-dymet.html>
- [18] <http://www.inovati.com/KMequipment/KM%20Components/Handheldgun.php>
- [19] <https://www.supersonicspray.com/products/standard-systems>
- [20] <http://vrcmetalsystems.com/site/wp-content/uploads/Gen-III-Spec-Sheet-201606.pdf>
- [21] https://www.impact-innovations.com/en/coldgas/cg_index_en.html
- [22] HÖLL, H. Stationary cold spray systems for industrial applications. *The Cold Spray Materials Deposition Process* [online]. Elsevier, 2007, 2007, s. 232-241 [cit. 2019-05-12]. DOI: 10.1533/9781845693787.2.232. ISBN 9781845691813. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9781845691813500127>
- [23] <http://www.plasma.co.jp/en/products/coldspray.html>
- [24] LI, Wenya, Hamid ASSADI, Frank GAERTNER a Shuo YIN. A Review of Advanced Composite and Nanostructured Coatings by Solid-State Cold Spraying Process. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences* [online]. 2018, , 1-48 [cit. 2019-05-12]. DOI: 10.1080/10408436.2017.1410778. ISSN 1040-8436. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10408436.2017.1410778>
- [25] LI, Wenya, Kang YANG, Shuo YIN, Xiawei YANG, Yaxin XU a Rocco LUPOLI. Solid-state additive manufacturing and repairing by cold spraying: A review. *Journal of Materials Science & Technology* [online]. 2018, **34**(3), 440-457 [cit. 2019-05-12]. DOI: 10.1016/j.jmst.2017.09.015. ISSN 10050302. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1005030217302293>
- [26] <https://www.longroom.com/discussion/853018/first-spee3d-cold-spray-metal-3d-printer-in-asia-with-190-000-namic-grant-for-singapore-3d-printing-r-d>

Seznam použitých zkratk a symbolů

Zkratky

CGDS	Cold Gas Dynami Spray
CS	Cold Spray
HPCS	High-pressure cold spray
LPCS	Low-pressure cold spray
MMC	Metal Matrix Composite

Symboly

C	[-]	konstanta (pro kritickou rychlost $C_1 = 1,2$; $C_2 = 0,3$)
c_{pp}	[J/kg.K]	tepelná kapacita částic
T_{pi}	[K]	teplota dopadu částic
T_m	[K]	teplota tání částic
T_r	[K]	pokojová teplota
u_{cr}	[m/s]	kritická rychlost částic
σ_{ult}	[Pa]	mez pevnosti v tahu
ρ_p	[kg/m ³]	hustota částic

Seznam obrázků

Obr. 2.1 Schéma Thurstonova patentu (A – tryska; B – vzduchové potrubí; C – násypka; D – komora; E, G – kovový prášek; H – nanesená vrstva [2])	2
Obr. 2.2 Nanesená vrstva hliníku (Převzato a upraveno z [3])	2
Obr. 2.3 První zařízení CS [2].....	3
Obr. 3.1 Výtrysk materiálu (Převzato a upraveno z [5]).....	4
Obr. 3.2 Narušení oxidické vrstvy (Převzato a upraveno z [5]).....	4
Obr. 3.3 Proces depozice pro a)měkké/tvrdé, b)tvrdé/měkké rozhraní (Převzato a upraveno z [7]).....	5
Obr. 3.4 Princip vzniku vrstvy (Převzato a upraveno z [4])	5
Obr. 3.5 Depoziční okno (Převzato a upraveno z [9])	7
Obr. 3.6 Rozsah velikostí částic [10]	7
Obr. 3.7 Závislost rychlosti částic na parametrech hnacího plynu (Převzato a upraveno z [11])	8
Obr. 3.8 Oblasti působení jednotlivých metod (Převzato a upraveno z [12]).....	9
Obr. 4.1 Schéma zařízení CS (Převzato a upraveno z [13]).....	10
Obr. 4.2 Schéma nízkotlakého zařízení (Převzato a upraveno z [1]).....	11
Obr. 4.3 Zařízení DYMET 413 [16]	12
Obr. 4.4 Schéma vysokotlakého zařízení (Převzato a upraveno z [1])	12
Obr. 4.5 Účinnost depozice systému PCS 1000 firmy Plasma Giken (převzato a upraveno z [13]).....	13
Obr. 4.6 Sestava zařízení Impact Innovations 5/11 [21]	14
Obr. 5.1 Ochranná vrstva cínu na měděných přípojnicích [4]	16
Obr. 5.2 Ochranná vrstva mědi na palivové nádrži [4]	16
Obr. 5.3 Měděný povlak na elektrickém chladiči [4].....	17
Obr. 5.4 Elektronické součástky [4].....	17
Obr. 5.5 Oprava zkorodovaného povrchu pomocí přenosného CS zařízení [25]	18
Obr. 5.6 Oprava otvorů u spojovaných panelů [4]	18
Obr. 5.7 Oprava odlitku [4].....	19
Obr. 5.8 Oprava kovových soch pomocí metody CS [4]	19
Obr. 5.9 3D výroba součástí [25]	20
Obr. 6.1 Oddělená vrstva mědi	21
Obr. 6.2 Roviny řezů pro jednotlivé vzorky (a) - měď/hliník, b) - měď/ocel)	22
Obr. 6.3 Struktura nanesené vrstvy mědi (a) - materiál měď/hliník, b) - materiál měď/ocel) – zvětšeno 100x.....	23
Obr. 6.4 Graf porozity nanesené vrstvy mědi	24
Obr. 6.5 Mikrostruktura nanesené vrstvy mědi po leptání (a) - měď/hliník, b) - měď/ocel) - zvětšeno 200x.....	25
Obr. 6.6 Mikrostruktura rozhraní vzorku měď/hliník (a) v nenaleptaném, b) v naleptaném stavu) - zvětšeno 200x.....	26

Seznam tabulek

Tab. 1 Kritická rychlost částic kovových materiálů (Převzato a upraveno z [9]).....	6
Tab. 2 Přehled nízkotlakých zařízení.....	11
Tab. 3 Přehled vysokotlakých zařízení	14
Tab. 4 Vývoj materiálů v metodě CS (Převzato a upraveno z [4]).....	15
Tab. 5 Výsledky porozit jednotlivých vzorků	24